

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪化, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响

孙晓伟, 郭秀锐, 程水源*

(北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为分析长江中游城市群电力行业对区域冬季空气质量的影响, 本研究基于自下而上建立的高分辨率排放清单, 以污染最严重的典型月份1月为模拟时段, 采用WRF-CAMx-PSAT模型模拟现状下电力行业对长江中游城市群的空气质量影响, 并另设置关停小机组和大机组替代小机组两种减排情景, 对区域空气质量影响进行评估。结果表明, 电力行业小机组对区域污染物浓度贡献占整个电力行业对区域污染物浓度贡献比例较大。关停小机组和大机组替代小机组情景下, SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的区域浓度贡献相对于关停前削减了 36.2% ~ 39.8%、30.5% ~ 33.5% 和 25.9% ~ 30.7%, 且两种减排情景的效果相近。鄂西北地区、湘西地区、襄荆宜经济带和江淮城市群四个地区的小机组污染物排放对区域电力行业污染物贡献影响最为明显, 两种减排情景下污染物贡献率相对于现状情景降幅在 40% ~ 70%。因此, 冬季小机组对长江中游城市群的区域影响较为明显, 应加强对长江中游城市群小机组的管控。

关键词: 长江中游城市群; 排放清单; 空气质量; 数值模拟; 电力行业

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3476-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201711186

Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River

SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan*

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A WRF-CAMx-PSAT model was applied to analyze the impact of the electric power industry on urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River. A high-resolution emission inventory based on a bottom-up approach was developed for air quality simulation. A typical month with heavy air pollution in this region (i. e., January) was chosen for simulation, and two mitigation scenarios were set for assessing lower capacity power units' impact on regional air quality. One scenario was for shutting down the lower capacity power units, and the other was for replacing lower capacity power units with higher capacity power units. Results showed that lower capacity power units contributed bigger pollutant concentrations to the regional contribution of the electric power industry. The concentration contributions of SO_2 , NO_x , and $\text{PM}_{2.5}$ in the two mitigation scenarios were reduced by 36.2%-39.8%, 30.5%-33.5%, and 25.9%-30.7%, respectively, than those under the current situation. Meanwhile, the decreases in pollutant concentration contribution for different regions were very similar for the two mitigation scenarios. In addition, lower capacity power units in four regions (i. e., northwest of Hubei province, west of Hunan province, Xiang-Jing-Yi economic belt region, and Hefei-centered urban agglomerations) contributed obviously to the regional pollutant concentration contributions of the electric power industry. Regional pollutant concentration contributions in the two mitigation scenarios were reduced by 40%-70%. Therefore, lower capacity power units make a bigger impact on the air quality of urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River and should be paid special attention to achieve better regional air quality.

Key words: urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River; emission inventory; air quality; numerical simulation; electric power industry

近年来, 随着区域经济的快速发展, 能源需求及能源消耗不断增长, 污染物排放量也呈现逐年增长的趋势。电力行业作为一个高产能和高耗能行业, 担任着国家“节能减排”的重任, 在我国的能源结构调整和区域经济发展方面都发挥着至关重要的作用。然而, 电力行业排放大量的 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘, 造成区域煤烟型污染及酸雨污染等传统环境污染问题, 也对区域性复合型大气污染做出了一定的贡献。尤其, 电力行业作为高架污染源, 产生的污染物可远距离传输, 不仅造成局地污染还会造成大

尺度的区域传输污染。因此电力行业污染排放影响到国内外学者的广泛关注。

数值模拟研究是一种能够有效评估典型行业污染源对区域影响的方法, 国内外学者基于

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209905); 国家自然科学基金项目(91544232, 51638001); 北京市科技计划课题项目(Z161100004516013, Z171100002217002); 中国工程院咨询研究项目(2016-XY-26)

作者简介: 孙晓伟(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域大气污染防治与规划, E-mail: sunxw_oscar@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

CALPUFF、WRF-CAMx、WRF-CHEM 等数值模型开展了大量的研究^[1~7]。总体而言,国内外学者对电力行业的数值模拟研究主要集中于国家、区域和城市这 3 个层面。就国内目前研究而言,研究重点更偏向于研究相对成熟的京津冀城市群区域,而对于污染仅次于京津冀城市群的长江中游城市群的研究尚少^[8]。随着“大气十条”的出台,电力行业超低排放改造提上日程,但目前各地区电力机组超低排放改造对象多优先考虑大机组,对于能耗高、污染重且严重制约电力行业节能减排和健康发展的中小电力机组的改造还面临着很大的困难。基于此,本文以较少受到关注的长江中游城市群区域为研究对象,以 2015 年为基准年,选取污染最为严重的 1 月为研究时段,采用 WRF-CAMx-PSAT 模型模拟了现状、关停小机组、大机组替代小机组这 3 个情景下电力行业对区域空气质量的影响,评估区域电力行业“上大压小”政策实施的环境效果,以期为环境空气质量改善提供一定的决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文以长江中游城市群地区为研究对象,研究范围涉及长江中游城市群及周边区域(长江三角洲城市群、珠江三角洲城市群部分、中原城市群部分、川渝城市群部分、福建省及周边相邻省),研究区域东西长约1 566 km,南北宽约1 512 km,总面积可达 237 km²(如图 1)。



图 1 研究区域示意
Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 排放清单的建立

本研究的基准年为 2015 年,研究区域长江中游城市群(湖南、湖北、安徽、江西四省)的排放清单主

要基于中国环境监测总站 2015 年的环境统计数据,其中工业源活动水平涉及了25 703个企业,居民源活动水平分辨率到区县级和交通源活动水平分辨率到地级市级。污染物排放因子主要基于大气污染物排放清单编制指南和文献研究成果,优先采用国内实测或本地化的研究成果,对于无国内研究成果可供参考时,参考国外类似排放条件下的排放因子^[9~16]。

1.2.1 电厂空间分布

据统计,长江中游城市群四省市燃煤电厂各机组的总装机容量达 1.1×10^5 MW,其中 200 MW 以上的机组约占总燃煤电厂机组的装机容量 80.3%,各省市装机总量及 200 MW 以上机组占比情况如表 1 所示。安徽省的总装机容量最大,约占整个城市群总装机容量的 41.6%,江西省的总装机容量最小约占城市群总装机容量的 16.5%;从 200 MW 以上机组分布可以看出(图 2),一些大型电厂主要分布于长江、湘江、赣江及其支流附近或靠近煤炭产区的区域,这与 Guttikunda 等^[2]研究印度燃煤电厂分布原因相似,这种分布特征既有利于电厂冷却水的获取,又方便获取煤炭资源。

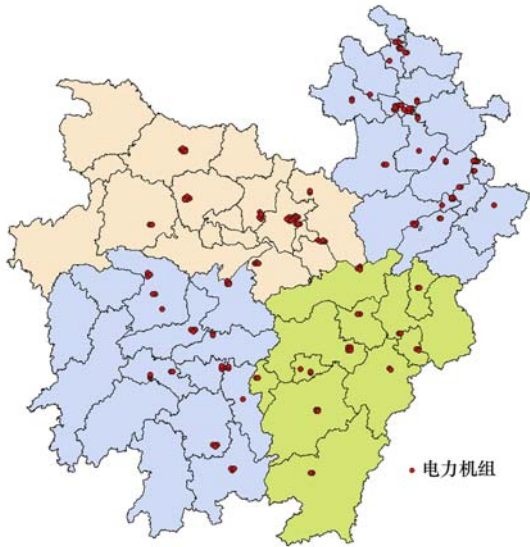


图 2 长江中游城市群地区 200MW 以上电力机组空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of power units over 200 MW in urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River

表 1 长江中游城市群各省电力行业装机容量情况

Table 1 Installed electricity capacity of provinces with urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River

省份	200MW 以上机 组装机容量/MW	总装机容量 /MW	200 MW 以上 机组占比/%
湖南	16 745	22 470	74.5
湖北	21 040	25 810	81.5
安徽	39 140	47 810	81.9
江西	15 470	18 960	81.6

1.2.2 电厂污染物排放量

高分辨率的区域污染物排放清单的获取是区域空气质量数值模拟的必要前提. 长江中游城市群电力行业主要污染物排放量如表 2 所示, 该排放量主要基于区域不同机组的发电标准煤耗和污染物排放因子核算获得(如表 3). 为了更好地表征典型污染物的空间和时间分布情况, 为后续区域空气质量模拟提供必要的支撑. 在污染物排放的空间分配上, 本研究基于地理信息系统, 根据不同发电机组经纬度将燃煤电厂不同机组排放量水平分配到各网格, 同时基于发电机组主要技术经济指标(如表 4), 根据不同机组烟囱高度将不同装机容量的发电机组的排放量垂直分配到 4 个不同高度层(小于 45 m 为第

一层, 大于 45 m 小于 100 m 为第二层, 大于 100 m 小于 150 m 为第三层, 大于 150 m 为第四层). 在污染物排放的时间分配上, 本研究主要参考课题组在京津冀地区进行的大量的实地调查和文献调研, 获取电力行业的时间分配系数, 从而将电力行业 1 月的排放量进行分配.

表 2 各省电力行业污染物排放量 $\times 10^4/\text{t}$
Table 2 Pollutant emission amounts of the electricity power industry for provinces $\times 10^4/\text{t}$

省份	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO
湖南	11.8	10.4	2.4	5.7
湖北	13.6	8.2	1.4	4.5
安徽	10.8	17.8	3.8	9.8
江西	10.9	9.7	1.7	5.3

表 3 不同装机容量机组污染物排放因子¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Pollutant emission factors for units with various installed electricity capacity/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

装机容量/MW	SO ₂ ^[9,17,18]	NO _x ^[2,17,19~21]	TSP ^[9]	PM ₁₀ ^[22,23]	PM _{2.5} ^[22]	CO ^[2,9,24]
<200	S	6.7~11.5	A	1.5A	0.4A	2.0
200~600	S	6.8~10.5	A	0.3A	0.1A	0.7
>600	S	4.1~8.1	A	$2.1 \times 10^{-2}A$	$1.5 \times 10^{-2}A$	0.7

1) S 指煤炭含硫量; A 指煤炭灰分量

表 4 发电机组主要技术经济指标

Table 4 Typical techno-economic indices of power units

机组类型	锅炉蒸汽参数	机组容量 /MW	烟囱高度 /m	发电标准煤耗 / $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
低温低压	—	<6	20	670
中温中压	3.43~3.82 MPa/435~445℃	6 12	30~45 45~60	500~525
高温高压	8.83 MPa/540℃	25 50 100	60~80 80~100 100~120	365~415
超高压	12.75 MPa/535℃	125 200	100~120 120~150	315~320
亚临界	16.6 MPa/537℃	300 600	150~180 210	300
超临界	24.2 MPa/566℃	300 600 900	180~210 210~240 210~240 240	290
超超临界	25~27 MPa/600℃ 27 MPa/600~620℃	600 1 000 660	210~240 240 240	274 270
超超临界二次再热	31 MPa/600~610℃	1 000	240	256

1.3 数值模拟及情景设置

1.3.1 模型选取

本文采用 WRF 中尺度气象模式、CAMx 空气质量模式模拟分析电力行业对空气质量的影响. 其中, WRF 采用 WRF V3.3 提供气象模拟背景场, CAMx 采用 CAMx V6.3 进行空气质量模拟. CAMx

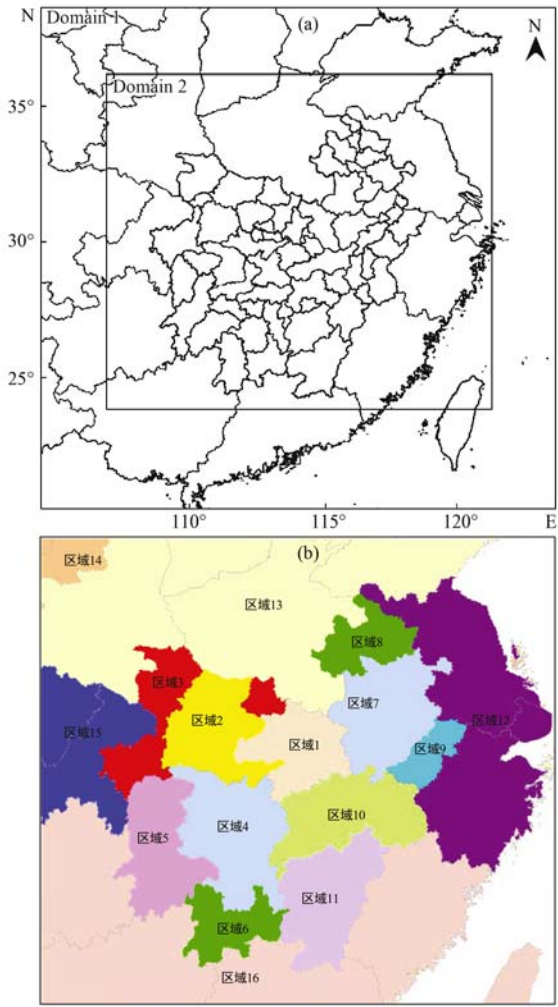
模型中的颗粒物来源示踪模块 PSAT, 能够针对不同种类的颗粒物, 进行不同地区污染源贡献识别, 进而确定排放源对目标区域污染物浓度的贡献情况. PSAT 能够追踪的颗粒物种类主要包括硫酸盐离子、硝酸盐离子、铵盐离子、汞离子、一次和二次有机气溶胶、元素碳、地壳离子以及其它颗粒

物^[25]。当前 CAMx-PSAT 模型工具已经广泛应用到颗粒物模拟研究当中^[26~28]。

1.3.2 模型设置

采用 CAMx V6.3 建立适合长江中游城市群的空气质量模型，地图投影采用兰波托投影，设置两层嵌套网格，如图 3(a) 所示，外层模拟区域分辨率为 27 km×27 km，覆盖华南和华中大部分地区；内层模拟区域空间分辨率为 9 km×9 km，主要覆盖长江中游城市群及周边城市群和省份。为了研究不同区域污染物来源对长江中游城市群污染的影响，根据地理边界和城市群区域对污染源区域进行标记，主要分了 16 个区域，如图 3(b) 所示，其中安徽省分 3 个区域(皖北地区、皖南地区、江淮城市群地区)，湖北省分 3 个区域(武汉城市群地区、襄荆宜经济带地区、鄂西北地区)，湖南省分 3 个区域(环长株潭城市群地区、湘西地区、湘南地区)，江西省分 2 个区域(环鄱阳湖城市群、赣南地区)，周边地区按照地理位置分为 5 个区域(长三角地区、华北地区、甘宁地区、川渝地区及南部地区)。

CAMx 的气象化学机制选用 CB05，水平扩散采用 PPM 机制，气溶胶化学采用 EBI 机制，光解速率常数由 TOMS 臭氧浓度资料计算，初始浓度采用大气背景值。模拟区域垂直方向共设置 13 个气压层，层间距自下而上逐渐增大。模拟气象场的 WRF V3.3 的初始背景边界条件采用美国国家环境预报中心(NECP)提供的 6h 一次、1°分辨率的全球对流层 FNL 数据集^[29]。WRF V3.3 模型模拟结果通过 WRF CAMx 程序转换为 CAMx 模型输入格式。空气质量模型 CAMx 所使用外围源排放清单为清华大学研发的 2012 年中国多分辨率排放清单，内层清单来自于本研究团队采用自下而上的研究方法建立的 2015 年长江中游地区大气污染物排放清单，主要包含 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、NH₃、CO 和 VOCs 等。模拟时段选择冬季的典型代表月 2015 年 1 月，主要由于 1 月的长江中游城市群大气污染最为严重(如表 5)，以重污染天气严重的月份作为对象开展



(a) 模型嵌套，(b) 区域标识；区域 1 代表武汉城市群，区域 2 代表襄荆宜经济带，区域 3 代表鄂西北地区，区域 4 代表环长株潭城市群，区域 5 代表湘西地区，区域 6 代表湘南地区，区域 7 代表江淮城市群，区域 8 代表皖北地区，区域 9 代表皖南地区，区域 10 代表环鄱阳湖城市群，区域 11 代表赣南地区，区域 12 代表长三角城市群，区域 13 代表华北地区，区域 14 代表甘肃青海地区，区域 15 代表成渝地区，区域 16 代表南部地区

图 3 模型嵌套及区域标识

Fig. 3 Nested model domains and source area mapping

研究，对长江中游城市群的大气污染防治更具有现实指导意义。

1.3.3 情景设置

电力行业对区域空气质量影响显著^[30]，尤其冬季采暖季，电力负荷较大，污染物排放量较大，再加之相对较差的气象条件，容易造成区域空气污染。小型燃煤发电机组存在煤耗大，污染治理措施不足，污染物单位排放量大，不利于管控等缺点，亟需予以关停改造或用大电厂来替代。《京津冀大气污染防治行动计划》已经出台对 200 MW 的非热电联产的燃煤机组的禁令，为了定量研究长江中游

表 5 典型城市空气污染天数情况¹⁾

Table 5 Days with air pollution for typical cities

城市	A/d	PM _{2.5} 平均浓度/μg·m ⁻³	B/d	C/%
合肥	10	151.2	32	31.3
武汉	16	165.7	48	33.3
长沙	18	161.8	38	47.4
湘潭	10	142.4	27	37.0

1) A 表示 2015 年 1 月中度及以上污染天数，B 表示 2015 年全年中度及以上污染天数，C 表示 A/B

地区小于 200 MW 的燃煤发电机组(以下称为小机组)冬季对区域空气质量的影响,以便更好地给政府决策提供参考.本研究设置 3 种情景进行对比分析:情景一,现状情况下电力行业对长江中游城市群冬季空气质量的影响;情景二,长江中游城市群的小机组全部关停情况下,电力行业对长江中游城市群冬季空气质量改善效果;情景三,长江中游城市群的小机组用大机组替代情况下,电力行业对长江中游城市群冬季空气质量改善效果.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

本文采用 CAMx 模式对长江中游城市群进行模拟,基于四省会城市(合肥、武汉、长沙、南昌)的国控监测站点的 $PM_{2.5}$ 小时监测数据,采用平均误差(NME)、相关系数(R)对模型模拟结果进行验证(如表 6).从表 6 可以看出四省会城市的 NME 值为 23.9%~46.2%,相对较大.这可能是由于:①模拟区域局限性,模拟区域并未包含所有对长江中游城市群有影响的区域,如川渝城市群和珠三角城市群仅包含了一部分;②数值模拟模型自身误差,WRF 模型及 CAMx 模型由于自身缺陷在模拟过程中存在一定的误差,如 WRF 在模拟风速风向的误差;③排放清单不确定性,如排放清单的编制过程中,在活动水平、排放因子上存在一定的误差且外围的清单采用的是清华的 MEIC 清单,基准年为 2012 年.四省会城市模拟值与监测值的相关系数(R)虽然部分值没有 Wen 等^[31]和贾佳等^[32]的模拟效果好,但 R 最高值可达 0.84,平均为 0.57,适用于后续模型的研究.

表 6 $PM_{2.5}$ 浓度模拟值与监测值对比

Table 6 Comparison between simulated and observed

项目	$PM_{2.5}$ concentrations			
	合肥	武汉	长沙	南昌
模拟值/ $\mu g \cdot m^{-3}$	87.2	120.2	130.1	51.2
监测值/ $\mu g \cdot m^{-3}$	102.2	129.1	119.2	68.4
NME/%	46.2	26.1	39.1	23.9
R	0.62	0.26	0.57	0.84

2.2 现状情景下电力行业排放影响

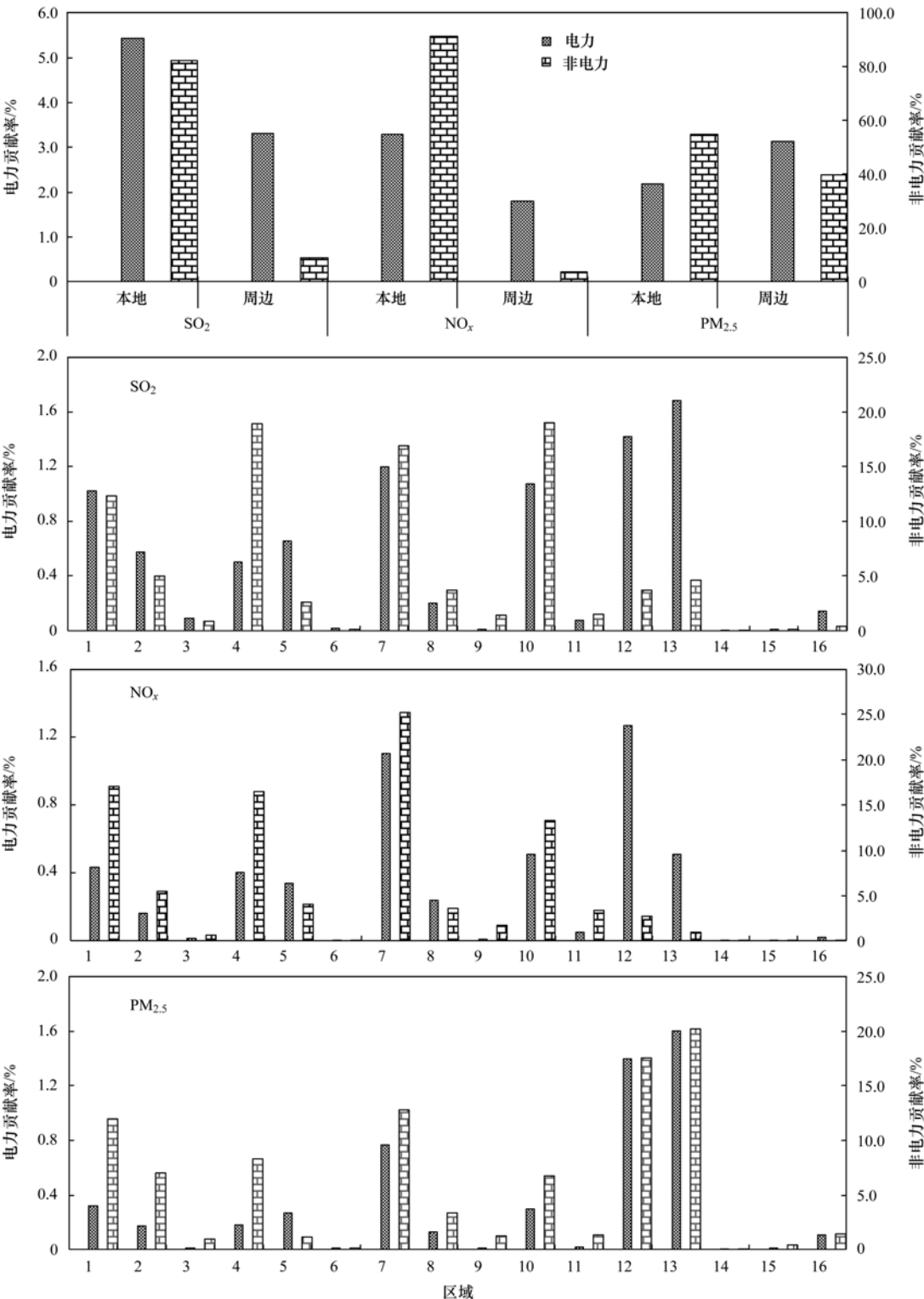
基于长江中游城市群 2015 年电力行业及非电力行业排放情况,采用 CAMx 模拟得到典型污染物的本地和周边的浓度贡献,如图 4 所示.从中可以看出,3 种污染物的本地贡献均大于周边贡献,说明 1 月长江中游城市群的污染主要来自本地排放

源.其中, NO_x 和 SO_2 的本地贡献均远大于周边贡献,本地贡献优势明显,约为 94.4% 和 87.5%. $PM_{2.5}$ 的本地贡献优势并不明显,仅占了 57.1%.从电力行业对区域污染物浓度贡献可以看出,电力行业对区域污染物浓度贡献并不高, SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献分别为 6.6%、3.8% 和 4.6%,其中长江中游城市群的电力行业对 $PM_{2.5}$ 的本地贡献仅为 1.5%,本地电力行业贡献明显小于周边电力行业贡献,这可能由于电力行业为高架源排放,其污染物排放具有长距离输送的特点.另外,周边电力行业排放贡献占区域电力行业排放贡献的 68%,周边电力行业贡献明显,这与杜晓慧等^[33]研究重污染期间京津冀电力行业影响的结论相符.从非电力行业对区域污染物浓度贡献可以看出,本地的非电力行业对区域贡献浓度明显大于周边的非电力行业对区域贡献,主要可能是由于非电力行业包含了工业源、交通源、居民源等,排放源高度比较低,因此,在冬季相对稳定的气象条件下,本地非电力行业排放污染物不易于远距离传输,对本地影响较大.

从长江中游城市群周边地区来看,长三角城市群和华北地区的电力行业对区域 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献均最高.长三角城市群和华北地区电力行业排放强度较大^[34],冬季的主导风向主要为偏北风和偏东风,利于高架点源的长距离传输,因此电力行业对区域的浓度贡献最高.从长江中游城市群区域来看,区域 1、区域 4、区域 7 和区域 10 所代表的武汉城市群、环长株潭城市群、江淮城市群、环鄱阳湖城市群的电力行业对区域 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献均较高,除此之外,襄荆宜经济带和湘西地区的电力行业对区域的污染物浓度贡献也较高.

2.3 关停小机组和大机组替代小机组情景下电力行业排放影响

为评估小发电机组对长江中游城市群区域的空气质量的影响,本研究设置两个情景:①关停小机组;②大机组(本研究以 660MW 机组为例)替代小机组.图 5 为两种情景下不同区域电力行业和非电力行业对长江中游城市群主要污染物(SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$)的浓度贡献率.从区域的本地贡献和周边贡献可以看出,长江中游城市群的 3 种主要污染物浓度贡献均呈现本地贡献大于周边贡献的情况,其中 SO_2 和 NO_x 的本地贡献较大,可达到 80%~95%, $PM_{2.5}$ 的本地贡献虽然较大(约 60%),但周边贡献



“本地”指长江中游城市群地区，“周边”指长江中游城市群地区之外地区，下同

图4 现状情景下区域污染物浓度贡献率

Fig. 4 Regional pollutant concentration contributions for the current scenario

也占据了很大的比例。这说明长江中游城市群不仅要加强本地污染源的防控，还要加强与周边省市的联防联控。从不同区域对长江中游地区的污染物浓度贡献来看，两种情景下，长三角城市群、华北地

区、武汉城市群、环长株潭城市群、江淮城市群、环鄱阳湖城市群、襄荆宜经济带对区域主要污染物浓度贡献率均较大。

从区域电力行业对长江中游城市群的浓度贡献

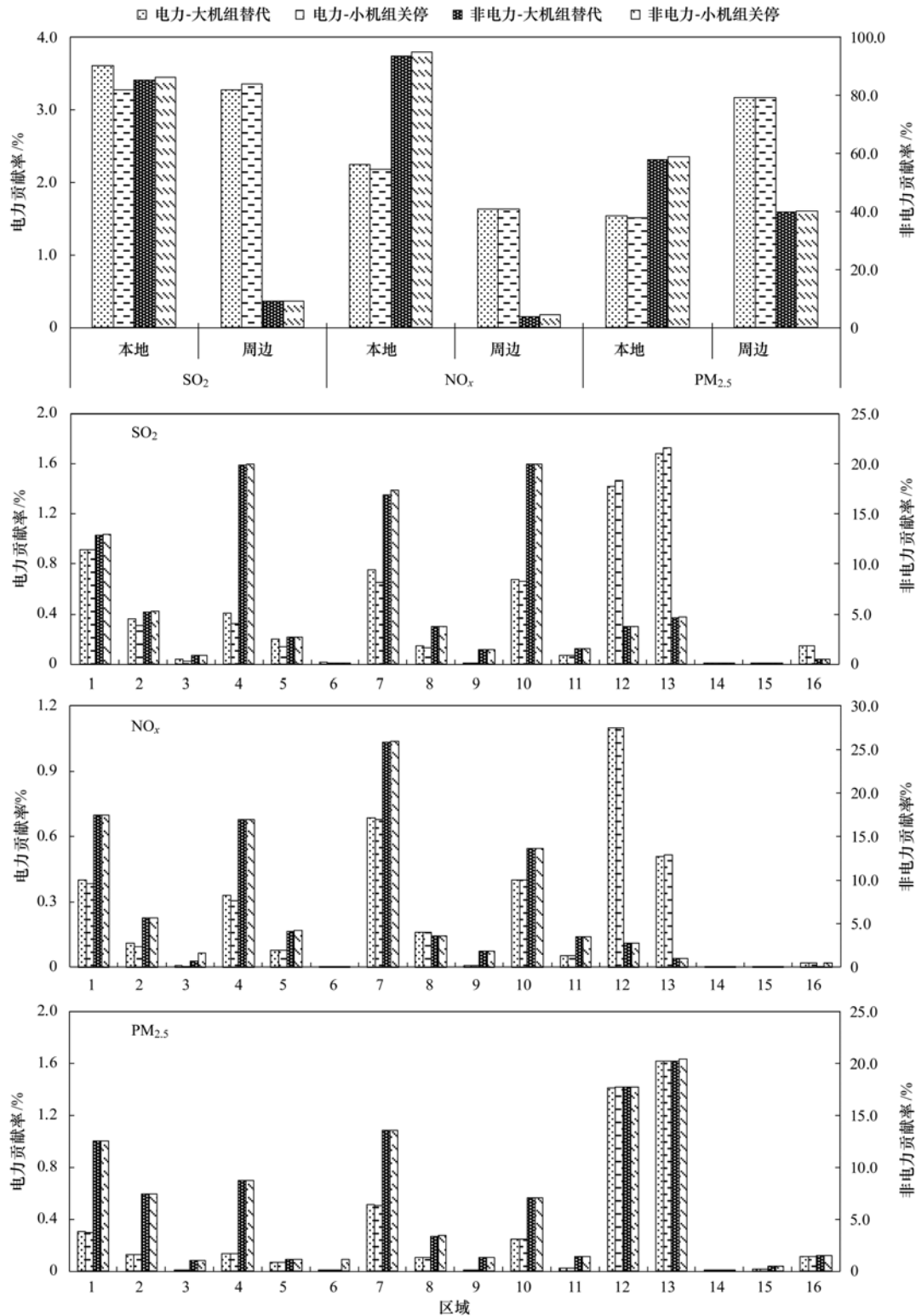


图5 两种不同情景下区域污染物浓度贡献率

Fig. 5 Regional pollutant concentration contributions for the two mitigation scenarios

来看,两种情景下电力行业对区域 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 的浓度贡献率比现状情景下分别下降了 36.2% ~ 39.8%、30.5% ~ 33.5% 和 25.9% ~ 30.7%。这说明小机组对电力行业在区域污染物浓度贡献较大。这可能是由于①小机组单位发电煤耗

大,排放因子相对较大,污染物排放量较大;②小机组一般排放高度相对较小,相对于大机组,不易于远距离传输,对区域的浓度贡献更大。就长江中游城市群各区域污染物浓度贡献而言,关停小机组和大机组替代小机组后,鄂西北地区和湘西地区的

电力行业对区域的 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率下降均大于 70%, 襄荆宜经济带和江淮城市群的电力行业对区域 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度贡献率下降也超过了 40%, 这可能的原因是这些地区的小机组在该区域电力行业中所占比例较大, 污染物排放相对较多, 因此, 两种情景下电力行业对区域污染物贡献率变化较大。

对比两种情景下长江中游城市群电力行业的本地污染物浓度贡献率, 虽然关停小机组情景小于大机组替代小机组情景, 但差别并不大。同时, 本地非电力行业、周边电力行业和周边非电力行业对长江中游城市群的污染物浓度贡献率也呈现同样的规律。这可能是由于大机组的单位发电煤耗较低, 一般能够达到超低排放标准, 污染物排放因子较小, 污染物排放量小, 且大机组的排放高度较高, 可以进行远距离传输, 因此对本地的浓度贡献较少。这说明了大机组替代小机组在保障区域空气质量上的可行性, 为电力行业上大压小政策提供了一定的理论支持, 也为决策者提供了一定的参考。另外, 本研究中大机组以 660 MW 机组为例, 并未将不同装机容量大机组替代进行对比, 主要基于现实调研中该装机容量以上机组一般采用超低排放, 实际排放标准差别并不大。同时, 本研究中大机组替代小机组主要基于总发电量不变的等装机容量替代情况, 对于大机组的地理布局、实际年发电时间及冬季是否优化时间段运行等因素并未考虑, 这也是本文后续需要进一步开展的工作。

3 结论

(1) 冬季长江中游城市群的污染主要来自于本地排放源, 其中 SO_2 和 NO_x 的本地贡献显著。

(2) 冬季长三角城市群、华北地区、武汉城市群、环长株潭城市群、江淮城市群、环鄱阳湖城市群、襄荆宜经济带对长江中游城市群的污染物浓度贡献较大。

(3) 关停小机组和大机组 (660 MW) 替代小机组两种情景下, 电力行业对区域 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度贡献率比现状情景下降超过 25%, 且大机组替代小机组效果与关停小机组效果相近。

(4) 关停小机组和大机组 (660 MW) 替代小机组两种情景下, 鄂西北地区、湘西地区、襄荆宜经济带和江淮城市群的电力行业污染物浓度贡献下降幅度最大, 应该加强对这些区域的电力行业小机组的管控, 以更好地改善区域空气质量。

参考文献:

- [1] Hao J M, Wang L T, Shen M J, *et al.* Air quality impacts of power plant emissions in Beijing[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 401-408.
- [2] Guttikunda S K, Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 449-460.
- [3] 薛文博, 许艳玲, 王金南, 等. 全国火电行业大气污染物排放对空气质量的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1281-1288.
Xue W B, Xu Y L, Wang J N, *et al.* Ambient air quality impact of emissions from thermal power industry [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1281-1288.
- [4] 朱文波, 李楠, 黄志炯, 等. 广东省火电污染物排放特征及其对大气环境的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(6): 810-818.
Zhu W B, Li N, Huang Z J, *et al.* Emission characteristics of thermal power in Guangdong province and influence on atmospheric environment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(6): 810-818.
- [5] 黄青, 程水源, 陈东升, 等. 近周边电厂源对北京市采暖期间 SO_2 的贡献分析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(5): 567-573.
Huang Q, Cheng S Y, Chen D S, *et al.* Beijing SO_2 source apportionment from regional power plants during heating season [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(5): 567-573.
- [6] 伯鑫, 王刚, 温秉, 等. 京津冀地区火电企业的大气污染影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, *et al.* Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 364-373.
- [7] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang Q, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [8] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 等. 2005—2014 年中三角城市群大气污染特征及变化趋势[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(5): 2977-2984.
Li T T, Wei P, Cheng S Y, *et al.* Air pollution characteristic and variation trend of Central Triangle urban agglomeration from 2005 to 2014 [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(5): 2977-2984.
- [9] 周颖. 区域大气污染源清单建立与敏感源筛选研究及示范应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
Zhou Y. Study and application of regional atmospheric pollutants emission inventories development and sensitive emission sources identification[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [10] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 305-317.
- [11] Lang J L, Cheng S Y, Wei W, *et al.* A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region,

- China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 605-614.
- [12] 刘欢, 贺克斌, 王岐东. 天津市机动车排放清单及影响要素研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, **48**(3): 370-373.
- Liu H, He K B, Wang Q D. Vehicular emissions inventory and influencing factors in Tianjin[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, **48**(3): 370-373.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293619540.pdf>, 2014-08-20.
- [14] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(第十分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587771088.pdf>, 2014-08-20.
- [16] 中华人民共和国环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [17] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-13317.
- [18] Xu Y, Hu J L, Ying Q, *et al.* Current and future emissions of primary pollutants from coal-fired power plants in Shaanxi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 505-514.
- [19] Zhang Q, Streets D G, He K B, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: the view from the ground and the view from space[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D22): D22306.
- [20] Tian H Z, Liu K Y, Hao J M, *et al.* Nitrogen oxides emissions from thermal power plants in China: current status and future predictions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(19): 11350-11357.
- [21] 牟莹莹, 郑新梅, 李文青, 等. 南京市工业源大气污染物排放清单的建立[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(3): 204-210.
- Mu Y Y, Zheng X M, Li W Q, *et al.* Development of an industrial air pollutants emission inventory of Nanjing city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(3): 204-210.
- [22] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(12): 1515-1523.
- [23] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al.* A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(1): 481-501.
- [24] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [25] 安静宇, 李莉, 黄成, 等. 2013年1月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(10): 2635-2644.
- An J Y, Li L, Huang C, *et al.* Source apportionment of the fine particulate matter in Shanghai during the heavy haze episode in eastern China in January 2013[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(10): 2635-2644.
- [26] 陈国磊, 周颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4069-4079.
- Chen G L, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on PM_{2.5} in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4069-4079.
- [27] Sun X W, Cheng S Y, Li J B, *et al.* An integrated air quality model and optimization model for regional economic and environmental development: a case study of Tangshan, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(6): 1592-1609.
- [28] Nopmongcol U, Liu Z, Stoeckenius T, *et al.* Modeling intercontinental transport of ozone in North America with CAMx for the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII) Phase 3[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9931-9943.
- [29] National Center for Atmospheric Research. CISEL research data archive[EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>, 2015-08-13.
- [30] 朱新胜, 王学远, 叶海, 等. 火电厂排放源对张家港市冬季空气质量的影响[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, **17**(4): 371-378.
- Zhu X S, Wang X Y, Ye H, *et al.* Influence of power plant emissions on winter air quality of Zhangjiagang city[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, **17**(4): 371-378.
- [31] Wen W, Cheng S Y, Chen X F, *et al.* Impact of emission control on PM_{2.5} and the chemical composition change in Beijing-Tianjin-Hebei during the APEC summit 2014[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(5): 4509-4521.
- [32] 贾佳, 郭秀锐, 程水源. APEC期间北京市 PM_{2.5} 特征模拟分析及污染控制措施评估[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- Jia J, Guo X R, Cheng S Y. Numerical study on the characteristics of PM_{2.5} in Beijing and the assessment of pollution control measures during APEC[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- [33] 杜晓惠, 徐峻, 刘厚凤, 等. 重污染天气下电力行业排放对京津冀地区 PM_{2.5} 的贡献[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(4): 475-482.
- Du X H, Xu J, Liu H F, *et al.* Contribution of power plant emissions to PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei area during heavy pollution periods[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 475-482.
- [34] MEIC. 中国多尺度排放清单[EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, et al. (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, et al. (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, et al. (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, et al. (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, et al. (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, et al. (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, et al. (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, et al. (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, et al. (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, et al. (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, et al. (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, et al. (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, et al. (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, et al. (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, et al. (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, et al. (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, et al. (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)